

2021年青海玛多 M_s 7.4地震前 都兰地电场异常特征^{*}

李霞, 赵玉红, 冯丽丽, 刘磊, 苟智栋, 苏维刚

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 2021年青海玛多 M_s 7.4地震前, 都兰地电场观测资料出现了显著异常变化。通过分析都兰地电场年变形态, 长、短极距比值及经相关距平去除年变后时序图, 并与2019年夏河 M_s 5.7地震的震前异常特征进行对比研究, 得出以下主要结论: ①2020年7月原始地电场观测曲线均开始出现不同程度的年变变化, 且长、短极距6个测道同步变化, 主要表现为年变减小, 达到最低点后转折加速上升, 其中以北南测道变化最为显著; ②地电场长、短极距测值比结果显示, 各方向均在震前出现“V”字型变化, 且幅度大、速率快; ③都兰地电场观测日均值经相关距平法去除年变后, 自2020年5月后曲线呈现出趋势性或快速下降的形态, 区间变化值均小于2015—2020年均值水平, 甚至低于两倍均方差水平, 异常形态显著。综合分析认为, 自2020年以来都兰地电场出现的异常变化与2021年玛多7.4级地震的孕育与活动过程具有一定关联。

关键词: 都兰地电场; 玛多 M_s 7.4地震; 前兆异常特征; 震例研究

中图分类号: P319.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)04-0642-08

0 引言

地电场是指地球表面天然存在的电场, 根据场源的不同可分为大地电场和自然电场(中国地震局监测预报司, 2010)。剧烈的区域构造活动常导致许多场地应力应变、地下流体发生变化, 这种变化会通过地电场在大空间范围得以体现。人类在19世纪初已经观测到地球表面存在电流; 1940年, Chapman和Bartels提出了大地电场ET、自然电场ESP的概念(孙正江, 王华俊, 1984); 1984年, 希腊学者提出从地电场观测资料中提取Seismic Electric Signals (SES)信号开展地震预测的VAN法(Varotsos, Alexopoulos, 1984), 该方法主要应用了自然电场数据(马钦忠等, 2004), 但方法本身一直存在争议(黄清华, 2005)。

大地电场作为我国地震预测预报的重要手段之一, 为了保证地电场测量数据的准确性和可靠

性, 及时检测和排除测量系统中可能出现的有关问题, 我国大多数地电场观测台站通过借鉴国外在地电场观测研究中的成功经验, 均采用了“多方向、多极距”的电极布设方法(中国地震局监测预报司, 2010)。应用地电场数据开展地震预测分析最早主要是常规波形分析方法(钱复业, 赵玉林, 2005), 近20年来也探索了多种分析方法, 如频谱分析(范莹莹等, 2010)、极化方位计算(毛桐恩等, 1999)、长短极距比值计算(田山等, 2009)等。随着对大地电场的物理解析认识的深入, 地震工作者近年还探索了自然电场和大地电场的初步分离原理(谭大诚等, 2012), 逐步发展出地电场优势方位角分析方法(谭大诚等, 2011, 2014, 2019)。这些方法均在地震预测预报工作中取得了一定成效。

2021年5月22日2时4分在青海省果洛州玛多县(34.59°N, 98.34°E)发生 M_s 7.4地震, 震源深度17 km。笔者通过对青海地区地电场资料进

^{*} 收稿日期: 2021-06-10.

基金项目: 中国地震局科技星火计划——南北地震带地磁垂直强度极化分频特征研究(XH21037Y)、中国地震局震情跟踪定向工作任务——地磁垂直强度极化分频特征及预报指标建立(2021010413)与青海省地震局基金课题——高压直流输电线路对电磁观测影响的定量分析(2021A03)联合资助。

第一作者简介: 李霞(1988-), 工程师, 主要从事地震预测预报分析工作. E-mail: lxqhdz@163.com.

行跟踪分析, 研究玛多 $M_s7.4$ 地震前青海都兰地电场出现的显著异常形态, 并与 2019 年 10 月 28 日夏河 $M_s5.7$ 地震前异常形态进行对比研究。

1 观测台站地震构造背景

都兰地震台位于青海省海西蒙古族藏族自治州都兰县, 是青海省地震局专业地震台站之一, 属国家 II 类地震台, 建设于 1994 年。2013 年因修建高速公路, 电磁观测场地于 2014 年 11 月 10 日整体搬迁至都兰县东山根二队砖厂。都兰县周边有 4 条规模较大的断裂带, 以 NW 走向为主, 分别为柴达木盆地北缘断裂带、柴达木盆地南缘断裂带、昆中断裂带、东昆仑活动断裂带 (图 1)。都兰地震台位于柴达木盆地的腹部, 该地区由于受喜马拉雅运动的影响, 新构造运动十分强烈, 深大活动性断裂规模大, 地处可可西里—巴颜喀拉、柴达木两大地震带之间, 地震活动频繁、强度高, 是破坏性地震多发的地区之一。

都兰地电场观测场地自搬迁至砖厂以来, 主要采用 ZD9A-II 型数字电场仪进行观测, 其测量分辨率优于 $10\ \mu\text{V}$, 为 $1\sim10\ \mu\text{V}$ 。该场地主要采用“多方向、多极距”观测方法, 正北、正东布设, 布极方式为“L”型, 为北南、东西、 $N45^\circ\text{E}$ 3 个测向长、短极距 6 道测线。北南、东西向长、

短极距各为 300 m、150 m, 具体地电场布极装置方式如图 2a 所示。线路采用绝缘铠装电缆以地理的方式架设, 自观测以来装置系统稳定, 运行正常。都兰地电场观测场地地势东南高西北低, 属于第四纪沙质沉积物, 测区周围地形开阔 (图 2b), 环境稳定, 干扰较小。

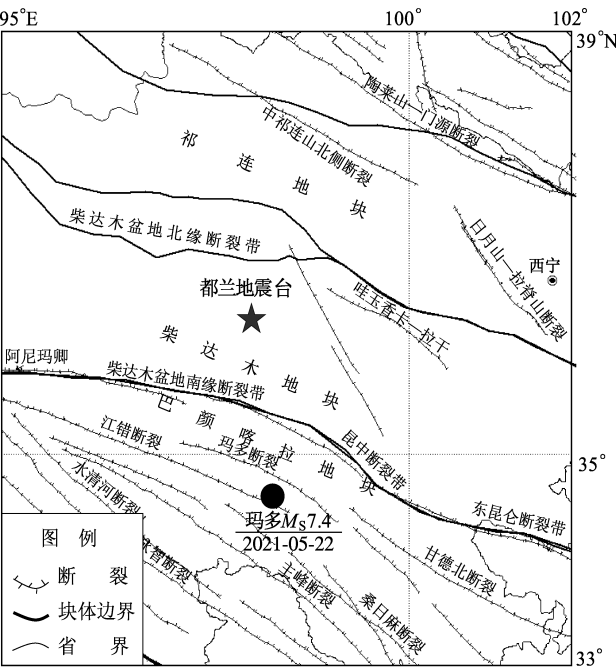


图 1 都兰地震台所在区域地质构造
Fig. 1 Geological structure around the Dulan Station

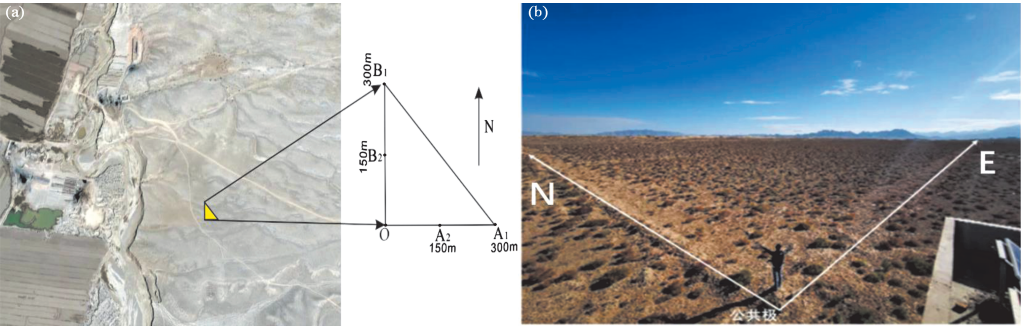


图 2 都兰台地电场观测布极示意图 (a) 及周边环境 (b)
Fig. 2 Layout electrode location diagram (a) and environment (b) of the Dulan Station

2 地电场异常特征分析

2.1 形态法

中国大陆地电场日变形态主要有“峰-谷”型、近直线型、无序变化型和混合型 4 种 (谭大

诚等, 2010; 陈有发等, 1999a, b)。都兰台地电场自 2015 年开始连续观测以来, 在磁静日时具有较规则且稳定的变化形态, 呈现“峰-谷”型的日变化以及“冬高夏低”的年变化形态。日变化形态第一峰值优势到时集中在北京时间 7—9 时, 谷值优势时间集中在 12—14 时。第二峰值优势时

间集中在 17—18 时, 谷值较为明显。年变形态表现为每年 8—9 月达到年变低点后转折并上升, 随后在次年 2 月左右达到年变最高点, 期间虽存在小幅度波动变化, 但不影响整体年变趋势和极值拐点变化。到目前为止, 都兰台地电场已连续、稳定观测 6 a。

通过梳理都兰台地电场观测资料, 笔者发现 2020 年 7 月各测项观测数据均开始出现不同程度的破年变变化, 且长、短极距 6 个测道变化同步, 主要表现为年变减小, 到达最低点后转折并加速上升, 其中以 NS 测道变化最为显著, NE 向变化幅度较小 (图 3)。NS 向长极距观测数据于 2020 年 7 月 4 日出现年变低值拐点, 随后并未按照以往变化趋势上升, 而是平稳变化近两月后于 9 月 23 日开始加速上升, 2021 年 3 月 22 日达到

年变最大值后逐渐减小, 相较往年年变低值拐点推迟约 1 个月, 年变幅较往年增大 37% (图 3a); NS 向短极距观测数据于 2020 年 6 月 15 日达到历史年变最低点, 平稳波动 18 d 后加速上升, 于 10 月 1 日到达年变最大值, 年变幅较往年增大 2 倍 (图 3b)。EW 向长极距观测数据于 2020 年 2 月 7 日出现年变低值拐点后转折上升, 于 4 月 21 日出现快速下降趋势并在 6 月 16 日达到年变最低值, 之后加速上升, 在 9 月 23 日到达 2020 年年变最大值, 期间多次出现显著的加速变化, 较往年年变幅增大 58% (图 3c); EW 向短极距观测数据于 2020 年 6 月 15 日到达年变最小值, 7 月 3 日出现转折上升趋势, 10 月 1 日达到年变最大值, 年变幅较往年增大 57% (图 3d)。具体参量信息见表 1。

表 1 都兰台地电场日均值年变化量统计表
Tab. 1 Statistical table of annual variation of the daily mean value of geo-electric field by the Dulan Station

年份	测向	最高值日期	最高幅度值/ (mV · km ⁻¹)	最低值日期	最低幅度值/ (mV · km ⁻¹)	年变化量/ (mV · km ⁻¹)
2015	NS 向长极距	无效	无效	2015-09-03	0.09	无效
2016		2016-02-13	7.84	2016-09-20	-0.52	8.36
2017		2017-02-08	7.71	2017-08-23	-0.44	8.15
2018		2018-02-06	7.18	2018-07-14	-0.50	7.68
2019		2019-02-07	5.87	2019-10-18	-4.53	10.40
2020		2020-02-29	1.46	2020-07-04	-6.54	8.00
2021		2021-03-22	3.79	无效	无效	无效
2015	NS 向短极距	无效	无效	2015-05-25	9.64	无效
2016		2016-08-21	13.61	2016-03-07	9.44	4.17
2017		2017-11-02	14.06	2017-06-09	9.52	4.54
2018		2018-11-03	12.33	2018-06-02	7.75	4.58
2019		2019-09-11	12.34	2019-06-15	6.58	5.76
2020		2020-10-01	14.1	2020-06-15	2.90	11.20
2015	EW 向长极距	无效	无效	2015-12-29	1.01	无效
2016		2016-08-03	3.98	2016-03-08	-0.38	4.36
2017		2017-09-08	2.55	2017-01-23	-0.93	3.48
2018		2018-07-22	0.75	2018-02-06	-1.8	2.55
2019		2019-09-28	2.16	2019-06-11	-0.86	3.02
2020		2020-09-23	1.37	2020-06-19	-4.27	5.64
2015	EW 向短极距	无效	无效	2015-09-09	-3.06	无效
2016		2016-02-13	5.69	2016-08-03	-2.93	8.62
2017		2017-02-17	5.74	2017-09-08	-1.73	7.47
2018		2018-02-06	6.73	2018-07-22	-0.83	7.56
2019		2020-11-23	-12.34	2019-06-15	-21.26	8.92
2020		2020-10-01	-9.6	2020-06-15	-22.40	12.80

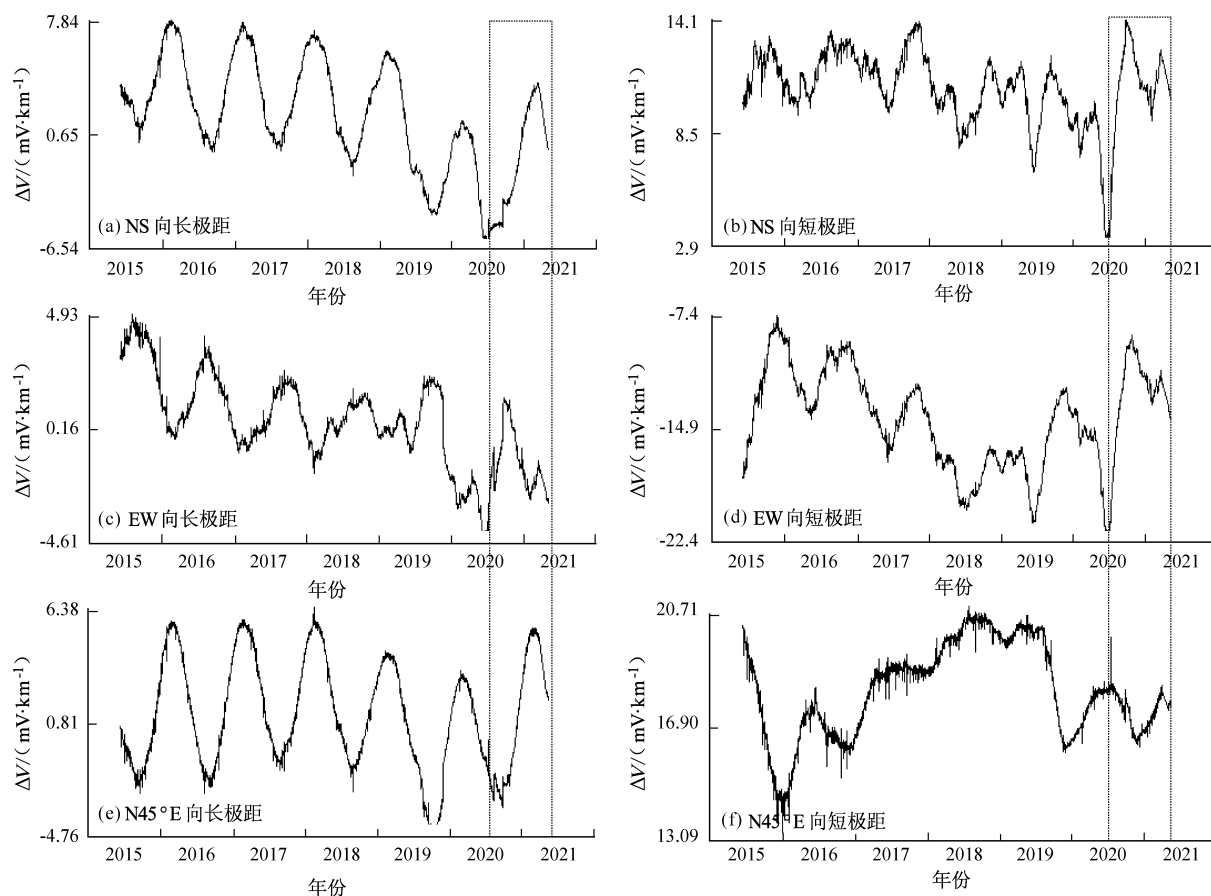


图3 都兰台地电场日均值观测时序曲线

Fig. 3 Time series curve of daily mean value of the geo-electric field by the Dulon Station

经调查,自2020年7月以来都兰地电场出现的显著破年变形态可以排除降雨、磁扰及其它干扰因素,综合分析认为该变化属于前兆异常且具有一定信度。异常出现10个月后,于2021年5月22日发生玛多 $M_s7.4$ 地震,震中距170 km。

2.2 长、短极距比值法

大量研究表明,当地电场的场源观测点足够远时,在各向同性的均匀介质中,同一方向的长、短极距观测到的地电场强度应该是一致的(马钦忠等,2004;田山等,2009)。而在实际地电场观测中,由于测量电极的极化电位不同,以及所处构造背景差异性,不同台站、不同测向观测数据会存在差异。利用这一特征,地震工作者总结出一种简单有效的大地电场异常提取手段——长、短极距测值比值法。

2015—2019年,都兰地电场长、短极距测值比值结果呈现出正常年变趋势,于每年2—3月达到高点,8—9月达到低点,NS向比值为

$-0.5 \sim 1$,EW向比值为 $-0.5 \sim 0.2$,整体变化幅度小(图4)。NS向比值自2020年6月2日开始快速下降,6月16日达到最小值,平稳波动18 d后,于7月4日快速上升,7月7日持续平稳变化,继续保持同期年变化形态,期间持续一个月的“V”字型变化,变幅大、速率快、异常特征显著;EW向比值自2020年9月22日出现快速下降,10月26日回返,呈现出类似NS向的“V”字型变化。该异常出现11个月后发生玛多 $M_s7.4$ 地震。而2019年10月28日夏河 $M_s5.7$ 地震前,NS向比值自2019年7月出现年变低点推迟3个月的破年变形态,EW向比值自2019年1月起无显著年变形态,明显异于以往变化,笔者认为该异常属于夏河地震的前兆异常。

2.3 相关矩平法

大地电场观测由于受到气温、气压、降雨、地下水位及其他因素的影响,所以观测曲线会表现出明显的年变化季节性特征。然而,和地震有

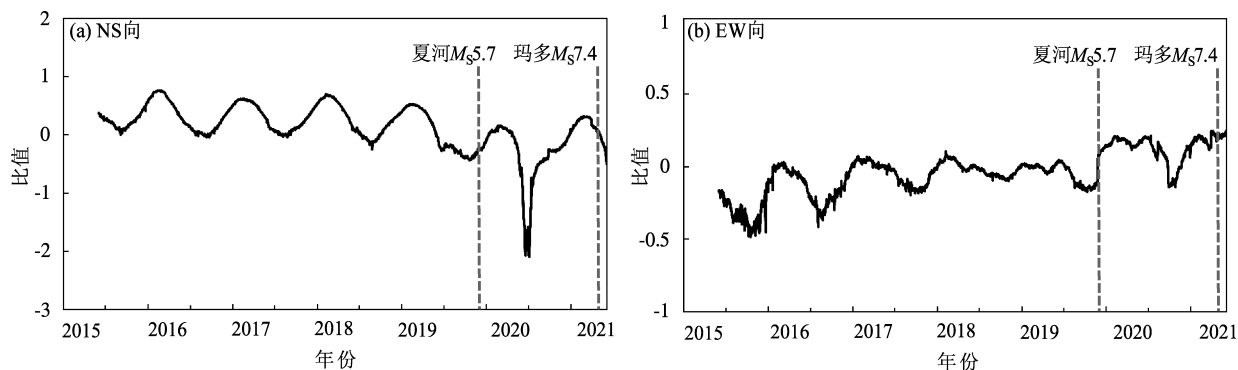


图4 都兰台地电场 NS 向 (a)、EW 向 (b) 日均观测数据长、短极距比值

Fig. 4 Ratio of long- and short-pole distance of daily mean observation data of the geo-electric field in NS direction (a) and in EW direction (b) by the Dulan Station

关的电场信号较弱,且往往会掺杂在这些年变化中,从而使得大地电场异常提取工作愈发困难。所以,行之有效的数字信号处理方法不仅可以去除规律性年变,还可以提取与地震有关的电场信号,从而可更好地应用于地震预测预报工作中。

本文采用相关矩平法进行年变消除处理:通过计算前兆观测时间序列的同期均值,求出前兆观测的正常年动态曲线,对前兆观测时间序列作相关矩平分析来提取异常信息。首先取 m 组长度为 l 的 1 a 均值序列 F_{it} ,求取均值序列之间的相关系数 R_{ij} 为:

$$R_{ij} = \frac{\sum (F_{it} - F_i)(F_{jt} - F_j)}{\sqrt{\sum (F_{it} - F_i)^2 \sum (F_{jt} - F_j)^2}} \quad \begin{matrix} i, j = 1, 2, \dots, m \\ t = 1, 2, \dots, l \end{matrix} \quad (1)$$

式中: l 为均值个数(对于 5 日均值, $l = 72$;旬均值, $l = 36$;月均值, $l = 11$); F_i 、 F_j 为均值。

选择 R_{ij} 中最大的值(达到一定置信度的相关检验值)所对应的两组数据,求 2 a 时序叠加均值,可得新序列:

$$\{F_{yt}\} \quad (t = 1, 2, \dots, l) \quad (2)$$

将 F_{yt} 作为年动态曲线初值,再求 F_{yt} 与其它还未透入动态曲线年份的相关系数 R_{yj} 。同理,选择 R_{yj} 中最大值对应的年份的数据,和已选出的 2 a 数据作 3 a 时序叠加均值,得到新的年动态曲线。依次类推,直到均值序列 F_{it} 中再没有达到相关检验为止。

都兰地电场观测日均值经相关矩平法去除年

变后时序如图 5 所示,图中绿线为均值线,红色部分为两倍均方差线。NS 长极距向计算结果显示 2015—2019 年 5 月曲线呈现平稳变化,2019 年 5 月 28 日曲线趋势性下降,在下降过程中,于 2019 年 10 月 28 日发生夏河 $M_s 5.7$ 地震,随后在缓慢恢复上升过程中,于 2020 年 5 月 10 日再次出现加速下降并快速上升的“V”字型变化,异常出现 1 a 后,于 2021 年 5 月 22 日发生玛多 $M_s 7.4$ 地震(图 5a)。EW 长极距向计算结果显示 2015—2020 年 5 月曲线呈稳定变化,2020 年 5 月 30 日曲线加速下降形态明显,于 6 月 29 日快速上升,整体异常过程呈双“V”字型变化,且变化幅度大,异常出现 1 a 后于 2021 年 5 月 22 日发生玛多 $M_s 7.4$ 地震。两次地震之前的异常曲线,均在整体上呈现出趋势性或快速下降的形态,且区间变化值均小于历史均值水平,甚至低于两倍均方差水平,异常形态显著(图 5b)。

2.4 典型震例

2019 年 10 月 28 日夏河 $M_s 5.7$ 地震前,都兰地电场 6 个测道年变曲线均出现不同程度的年变值减小(图 6),超过三分之二的分量的年变低点达到历史最低值水平,且曲线较往年恢复上升的时间推迟近两月。整体看,NS 长极距向曲线异常形态最为显著:2019 年 6 月 20 日年变曲线出现小幅度转折趋势,然后快速下降,直至 10 月 18 日才出现上升趋势,使得 2019 年年变幅整体增大 30%。同样,其他分量于 2019 年均呈现出年变幅增大、速率加快的异常变化过程。

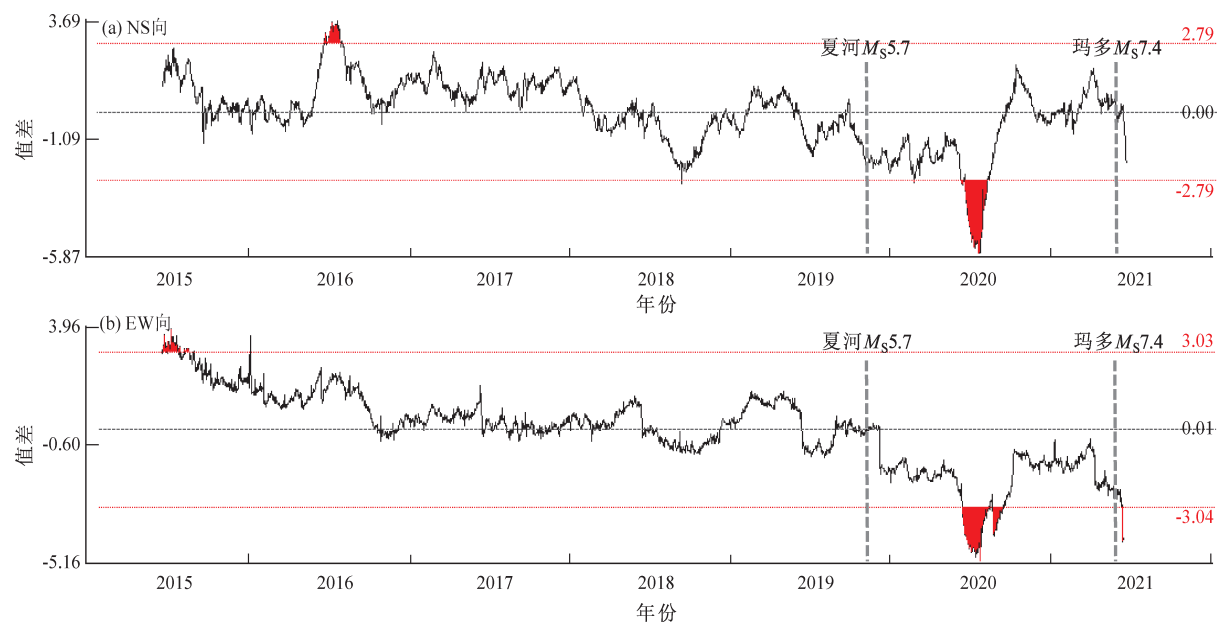


图 5 都兰台地电场观测数据经相关矩平法去除年变后时序图

Fig. 5 Time sequence diagram of the geo-electric field observation data by the Dulan Station after removal of annual variation by correlation moment plane method

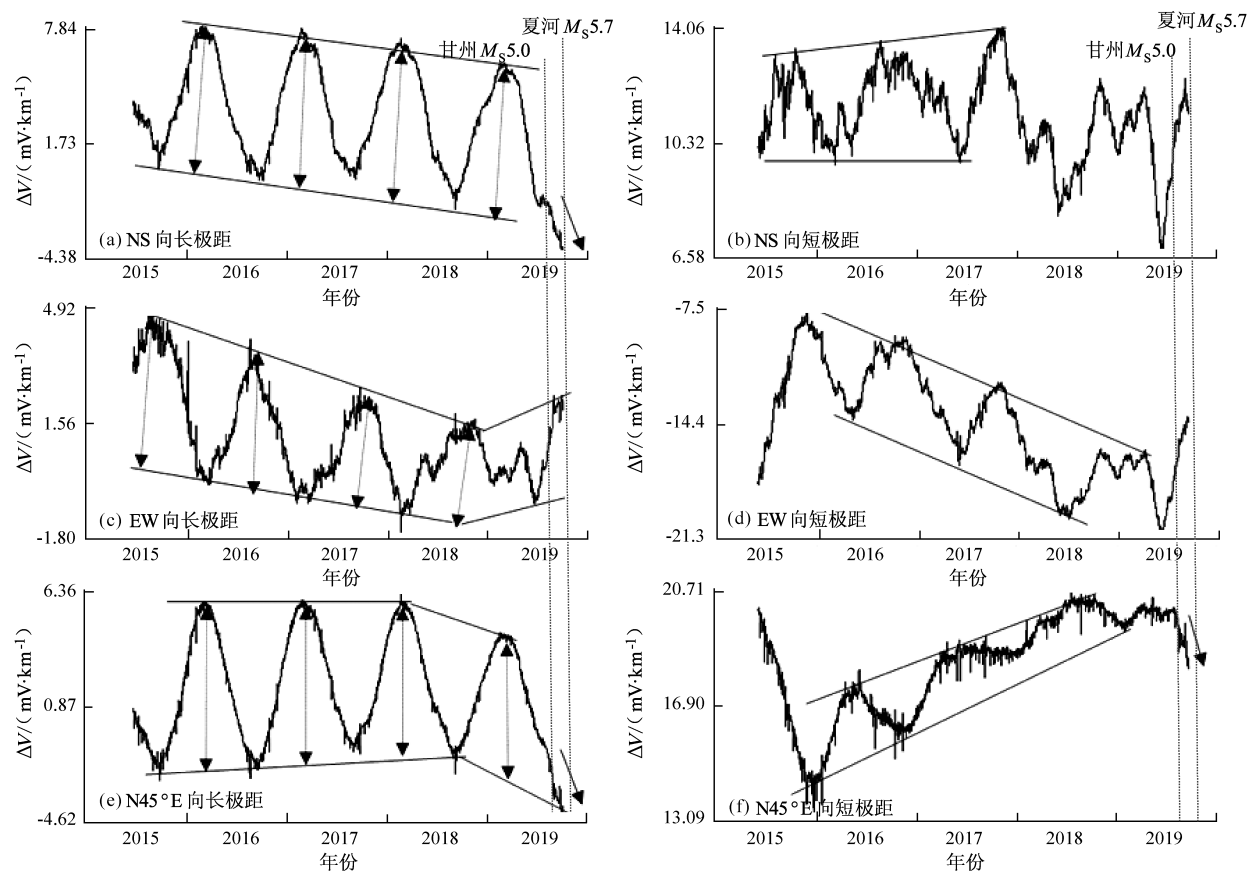


图 6 都兰台地电场不同方向日均值观测时序曲线与 2019 年夏河地震对应关系

Fig. 6 Relationship between the geo - electric field data in different dixeltions by the Dulan Station and the 2019 Xiahe earthquake

3 结论与讨论

2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震是继 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后中国大陆发生的震级最高的一次地震,震前大量前兆观测资料均显示出异常。笔者回溯了 2015—2021 年都兰地电场观测资料,重新梳理震例特征,认为玛多地震前都兰地电场确实存在异常电信号。首先,原始地电场观测数据于 2020 年 7 月出现显著破年变变化,且长、短极距 6 个测道同步变化,主要表现为年变减小,达到最低点后转折,并加速上升,其中以 NS 向测道变化最为显著,相较往年年变低值拐点推迟约一个月,年变幅较往年增大 37%;其次,通过计算都兰大地电场长、短极距观测比值发现,NS 向比值于 2020 年 6—7 月呈现快速下降后快速回返的“V”字型变化,EW 向比值 2020 年 9—10 月呈现出类似 NS 向的快速“V”字型变化,整体表现出变幅大、速率快的特点,异常特征显著;最后,利用相关矩平法去除都兰大地电场观测值年变后,NS 向和 EW 向长极距计算结果均显示曲线自 2020 年 5 月起加速下降形态明显,且变化幅度大,各分量曲线整体呈现出趋势性下降或快速下降的形态,且区间变化值小于 2015—2020 年的年均值水平,甚至低于两倍均方差水平,异常形态显著。

理论研究显示,地震前大地电场的变化可能由地下流体的过滤电动势机制引起(钱复业,赵玉林,2005;席继楼等,2010;孙正江,王华俊,1984)。地震发生前,由于板块内部挤压,震源区及周边应力挤压变化剧烈,导致岩石裂隙结构发生改变,从而影响地下流体的渗流结构,导致地下介质流体运移的突变以及离散电荷的增多,所以观测台站在某一时刻记录到的异常电信号正是地壳摩擦生成的感应电流(廖晓峰等,2019;李军辉等,2021;艾萨·伊斯马伊力等,2020),这进一步说明震前是存在异常电磁信号的。

虽然众多学者通过震例研究已验证震前大地电场确实可以记录到异常电信号,但该信号的异常表现形式多样化,与不同地区地下的电性结构密切相关,包括地下电性结构的非均匀性、电性各向异性等。对于震前大地电场变化特征在同一

构造体系内是否具有相似性,以及构造活跃带是否具有更显著的异常特点等,本文尚未讨论。相信随着观测资料的不断积累,异常认识水平的不断提高,震例总结工作将会得到进一步完善。本文所阐述的异常特征只是初步的认识,尚有待于更深入的研究与更多的地震事件来检验。

参考文献:

- 艾萨·伊斯马伊力,冯志生,陈界宏,等. 2020. 2020 年于田 $M_s6.4$ 地震前地磁极化异常特征分析[J]. 内陆地震,34(3):295–302.
- 陈有发,马钦忠,张杰,等. 1999a. 震前大地电场的前兆及其机理[J]. 高原地震,11(3):1–8.
- 陈有发,马钦忠,张杰,等. 1999b. 震前自然电场的前兆及其可能机理[J]. 华南地震,19(3):26–34.
- 范莹莹,杜学彬,Zlotnicki J,等. 2010. 汶川 $M_s8.0$ 大震前的电磁现象[J]. 地球物理学报,53(12):2887–2898.
- 黄清华. 2005. 地震电磁观测研究简述[J]. 国际地震动态,(11):2–5.
- 李军辉,姜楚峰,冯志生,等. 2021. 2013 年岷县—漳县 6.6 级地震前地磁日变化异常及机理分析[J]. 地震工程学报,43(3):551–558.
- 廖晓峰,冯丽丽,祁玉萍,等. 2019. 地磁极化方法在阿拉善 5.0 级地震中的应用研究[J]. 地震,39(4):127–135.
- 马钦忠,冯志生,宋治平,等. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析[J]. 地震学报,26(3):304–312.
- 毛桐恩,席继楼,王燕琼,等. 1999. 地震过程中的大地电场变化特征[J]. 地球物理学报,42(4):520–528.
- 钱复业,赵玉林. 2005. 地电场短临预报方法研究[J]. 地震,25(2):33–40.
- 孙正江,王华俊. 1984. 地电概论[M]. 北京:地震出版社,8–10.
- 谭大诚,王兰炜,赵家骝,等. 2011. 潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J]. 地球物理学报,54(7):1842–1853.
- 谭大诚,辛建村,王建军,等. 2019. 大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析[J]. 地球物理学报,62(2):558–571.
- 谭大诚,赵家骝,刘小凤,等. 2014. 自然电场的区域性变化特征分析[J]. 地球物理学报,57(5):1588–1598.
- 谭大诚,赵家骝,席继楼,等. 2010. 潮汐地电场特征及机理研究[J]. 地球物理学报,53(3):544–555.
- 谭大诚,赵家骝,席继楼,等. 2012. 青藏高原中强地震前的地电场变异及构成解析[J]. 地球物理学报,55(3):875–885.
- 田山,王建国,徐学恭,等. 2009. 大地电场观测地震前兆异常提取技术研究[J]. 地震学报,31(4):424–431.
- 席继楼,陈敏,董蕾,等. 2010. 长宁 $M_s6.0$ 地震前后地电场秒数据变化特征研究[J]. 地震,40(4):129–143.
- 中国地震局监测预报司. 2010. 地震电磁学理论基础与观测技术[M]. 北京:地震出版社,222.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquakes I [J]. Tectonophysics, 110(1):73–98.

The Variation of Geo-electric Field at the Dulan Seismic Station before the 2021 Maduo, Qinghai $M_s7.4$ Earthquake

LI Xia, ZHAO Yuhong, FENG Lili, LIU Lei, GOU Zhidong, SU Weigang
(*Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, Qinghai, China*)

Abstract

On May 22, 2021, an $M_s7.4$ earthquake occurred in Maduo County, Qinghai Province. Before the earthquake, the observed data of geo-electric field by the Dulan station showed significant abnormal changes and were of credibility to some extent. And the form of the curve of the data is similar to that of the data before the 2019 Xiahe $M_s5.7$ earthquake. The main manifestations of the anomaly are as follows: Firstly, the original observed data showed anomalous annual variations in different degrees in July 2020, and the 6 survey channels of long distance and short polar distance changed synchronously. The annual variations mainly decreased and rose rapidly after reaching the lowest point. Secondly, the ratio of the observed data between the long polar distance and short polar distance of the geo-electric field showed that the V-shaped variations appeared sharply and rapidly in all directions prior to the earthquake. Thirdly, after the annual variation is removed by the Correlation Moment Plane method, the curves of the daily observed mean value of the geo-electric field showed a trend or a rapid decline after May 2020, and the interval change values are all less than the historic average level, or even lower than twice the mean square deviation level, and the abnormal form is significant. We believe that the abnormal variations of the geo-electric field in Dulan region since the year 2020 are related with the genesis and evolution of the Maduo $M_s7.4$ earthquake.

Keywords: the Dulan geo-electric field; the Maduo $M_s7.4$ earthquake; premonitorily abnormal characteristics; case-study of earthquakes